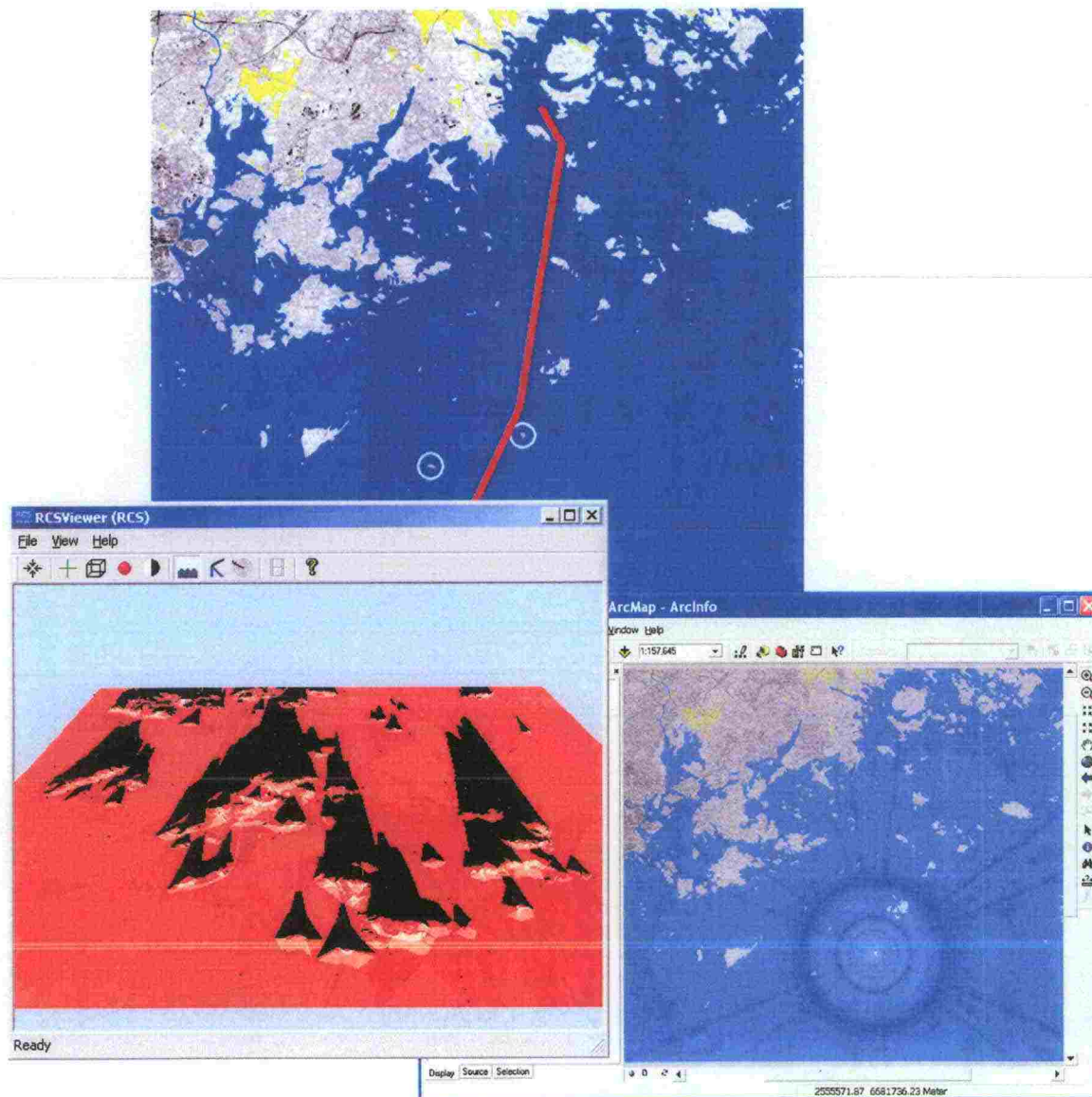


Tutkaheijastimien laskenta: Vuosaaren väylä / Itätoukki ja Länsitoukki.

VUOLI -projekti



Merenkulkulaitos

Helsinki 2006

ISSN 1456 - 9442



Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) VTT Tietotekniikka		Julkaisun laji Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja 6/2006	
W. Backman, A. Hujanen, S. Horsmanheimo, L. Tuomimäki, V-M Hagberg, H. Toivanen		Toimeksiantaja Merenkululaitos/Väylänpito, R. Joro Tiehallinto, VUOLI -projekti	
Tutkimus tutkasoppien ja saarien RCS -vasteesta		Toimielimen asettamispäivämäärä 15.02.2006	
Julkaisun nimi Tutkaheijastimien laskenta: Vuosaaren väylä / Itätoukki ja Länsitoukki.			
Tiivistelmä <p>Hankkeen tehtävänä oli suunnitella tutkaheijastinmalli Itätoukki- ja Länsitoukki-saarelle ja mallintaa sen näkyvyys Vuosaaren väylälle. Tutkaheijastinmallin suunnittelutyö tehtiin CAD-ohjelmistolla ottamalla huomioon tutkaheijastimelle asetetut paino- ja kokorajoitukset.</p> <p>Suunnitellulle tutkaheijastinmallille laskettiin sirontakuviot S- ja X-taajuusalueella vaaka- ja pystypolarisaatiolla. Mallille ennustettiin tutkanäkyvyys Vuosaaren väylän keskilinjalle 10 m, 20 m ja 30 m korkeuksilla. Selvitystä varten suoritettiin referenssilaskennat pistesirottajamallilla, koska todellisia mittaustuloksia alueelta ei ollut saatavissa. Laskennassa tutkittiin pistesirottaja-, monisirottaja- ja hybridimallin soveltuvuutta tutkanäkyvyyden mallintamiseen ja arvioitiin, mitä tutkanäkyvyyslaskentojen laajamittaisempi hyödyntäminen vaatii.</p> <p>Tulosten perusteella laskentamallien voidaan olettaa antavan oikeansuuntaisia arvioita tutkaheijastimelle, mutta ne todennäköisesti aliarvioivat saaresta syntyvää tutkaherätettä. Ongelmana ovat saarten 3D-mallinnuksessa tehdyt yksinkertaistukset, mistä syystä saarten kaarevat muodot eivät tule huomioiduksi oikein. Tehdyt yksinkertaistukset olivat välttämättömiä, jotta laskenta-aika ei kasvaisi kohtuuttoman pitkäksi. Laskentamallien kehittäminen ja verifiointi vaatii mittausten tekoa.</p> <p>Laskentamenetelmien hyödyntäminen suuremmassa mittakaavassa vaatii 3D-mallien automaattista luontia etenemisympäristöstä. Tämä on mahdollista tehdä korkeuskäyrä- ja rantaviiva-aineiston avulla. Etenemisympäristön avulla voidaan mallintaa ympäristön aiheuttamia katvealueita sekä sen vaikutusta tutkaherätykseen.</p>			
Avainsanat (asiasanat) Tutkapoikkipinta-ala, fysikaalinen ja geometrinen optiikka, diffraktio sähkömagneettinen tasoaalto, sironta.			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero Merenkululaitoksen julkaisuja 06/2006		ISSN 1456 - 9442	ISBN
Kokonaissivumäärä 2 + 27	Kieli Suomi	Hinta	Luottamuksellisuus Sisäiseen käyttöön
Jakaja		Kustantaja	

08 MKL



9286



Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Tavoite	3
3	Rajaukset	3
4	Tutkaheijastin- ja saarimallit	5
5	Menetelmät	10
5.1	Laskentamallit	10
5.1.1	Pistesirottajamalli	11
5.1.2	Monisirottajamalli	11
5.1.3	Hybridimalli	12
5.2	Laskenta-algoritmit	12
5.2.1	Ilman saarivaikutusta	12
5.2.2	Saarivaikutuksen kanssa	13
6	Laskennat	14
6.1	Laskentaparametrit	14
6.2	Laskentatapaukset	16
6.3	Laskentatulokset	17
6.3.1	Vain heijastin	17
6.3.2	Vain saarimalli	18
6.3.3	Heijastin ja saari	20
7	Jatkokehityskohteita	21
7.1	Tulosten esitys GIS-ohjelmistolla	21
7.2	Ympäristön huomiointi	23
7.3	Tutkanäkyvyyslaskentojen automatisointi	23
8	Johtopäätökset	24
9	Yhteenveto	25
	Lähdeviitteet	26



1 Johdanto

Tämä tutkimus on jatkoa kahdelle aikaisemmalle VTT:n Merenkululaitokselle tekemälle tutkaheijastinten analysointihankkeelle, joissa selvitettiin käytössä olevien tutkaheijastinmallien [1] ja uusien referenssimallien [2] sähkömagneettisia sirontaominaisuuksia S- (3 GHz) ja X-taajuusalueella (9 GHz). Tutkaheijastinten ominaisuuksia mallinnettiin VTT:llä kehitetyllä tutkapoikkipinta-alan laskenta-ohjelmistolla, CAST:illa [3]. Tätä ohjelmistoa on kehitetty yhdessä Merivoimien Tutkimuslaitoksen kanssa erilaisten kohteiden häiveominaisuuksien analysointiin.

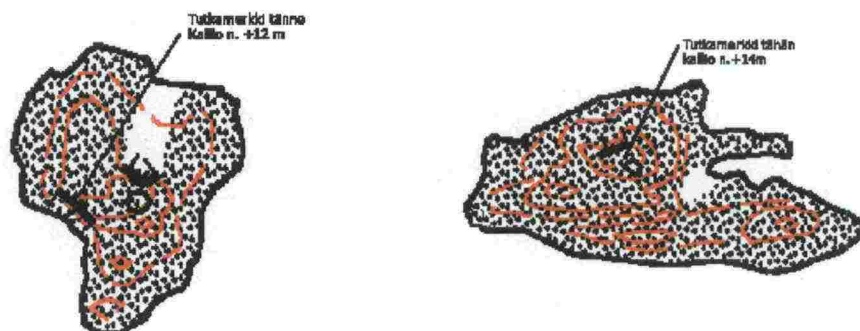
2 Tavoite

Projektin ensimmäisenä tehtävänä oli suunnitella tutkaheijastinmalli Vuosaaren väylän varrella oleville kahdelle saarelle, Itätoukille ja Länsitoukille. Toisena tehtävänä oli mallintaa tutkaheijastinmallin tutkanäkyvyys saarilta Vuosaaren väylälle. Mallinnuksessa tuli huomioida tutkaheijastimen sirontaominaisuudet ja tutka-aallon monitie-eteneminen vedenpinnan kautta sekä matkasta johtuva etenemisvaimennus. Kolmantena tehtävänä oli esittää laskentatulokset muodossa, joka on helposti jatkokäsiteltävissä.

3 Rajaukset

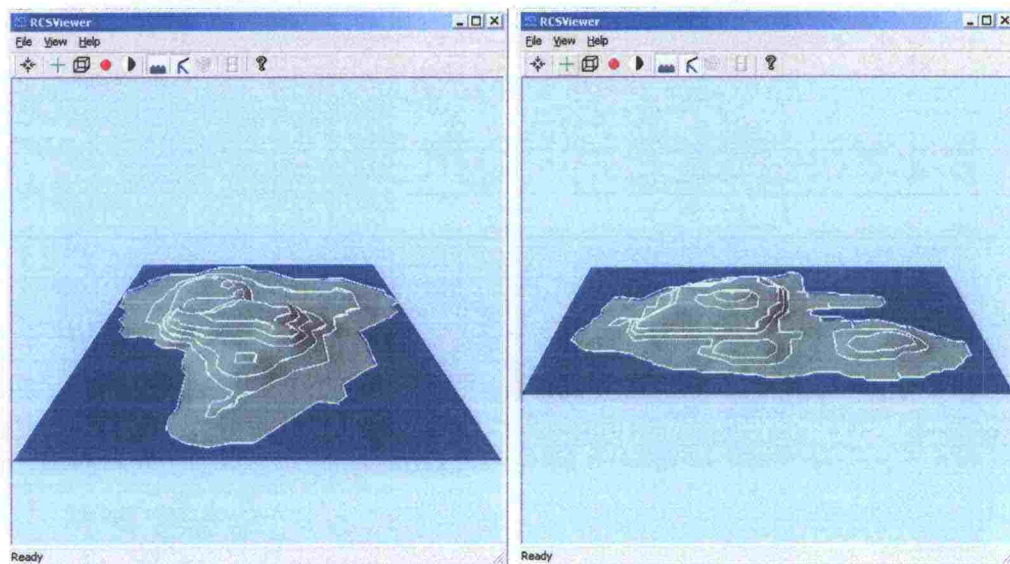
Tutkaheijastinmallin suunnittelun yhteydessä ei tehty heijastimen rakenteeseen liittyviä lujuuslaskentoja. Mitoitukset perustuvat turvamarginaalien käyttöön. Tutkaheijastinmallista luotiin 3D-mallit dwg- ja stl-formaatissa. Ensiksi mainittua käytettiin CAD-ohjelmistossa ja jälkimmäistä tutkanäkyvyyden arvioinnissa. Toteutetut 3D-mallit eivät sisällä valmistuskuviin tarvittavaa mitoitus tietoa, joten tutkaheijastimen valmistuskuvina niitä ei voi käyttää.

Saarten vaikutusta tutkanäkyvyyteen tarkasteltiin Itätoukki- ja Länsitoukki-saaresta tehdyillä 3D-malleilla. Mallinnuksen pohjana käytettiin Merenkululaitokselta saatua kartta-aineistoa, joka sisälsi saarten korkeuskäyrät 5 m korkeusresoluutiolla. Kuvassa 1 on esitetty saarten mallinnuksessa käytetty aineisto.



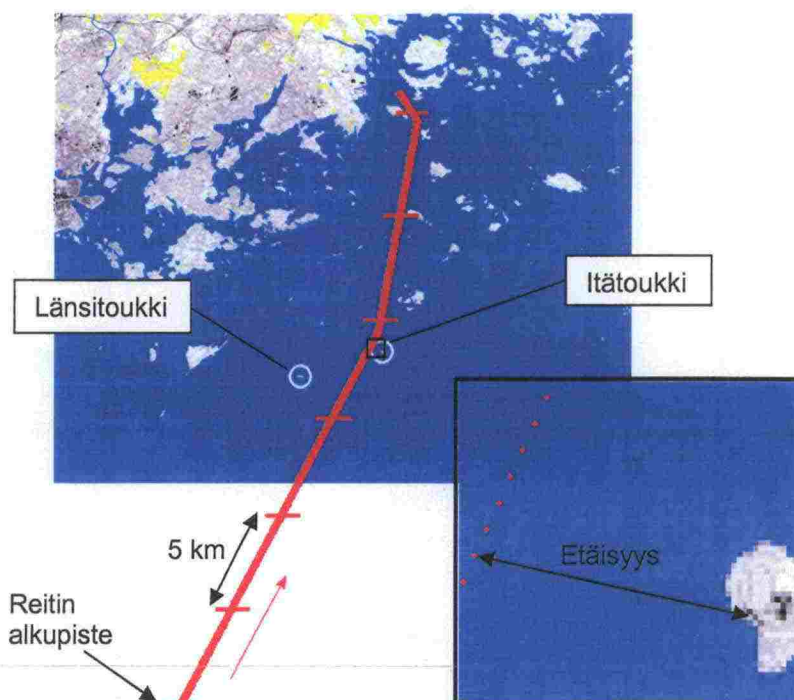
Kuva 1. Itätoukki- ja Länsitoukki-saaren lähtöaineisto.

Saaret ovat kallioisia, joten saarten sähkömagneettiset ominaisuudet asetettiin vastaamaan kiveä. Saarten pinta muodostettiin kolmioelementeistä ja saaret viipaloitiin tasoihin korkeussuunnassa 2,5 m välein. Tasojen avulla tutkittiin monisirottajamallin soveltuvuutta saaren tutkanäkyvyyden mallintamiseen. Malleihin kuului osana myös vedenpinta, jonka sähkömagneettiset ominaisuudet asetettiin vastaamaan merivettä. Kuvassa 2 on esitetty kartta-aineiston pohjalta luodut 3D-mallit saarista.



Kuva 2. 3D-mallit Itätoukki- ja Länsitoukki-saaresta.

Tutkaheijastimen näkyvyys laskettiin pitkin Vuosaaren väylän keskilinjaa. Kuvassa 3 on esitetty punaisella tarkastelureitti ja valkoisilla ympyröillä Itätoukki- ja Länsitoukki-saari. Laskennassa edettiin reitin alkupisteestä nuolen osoittamaan suuntaan eli mereltä satamaan päin. Kuvan osasuurenoksessa näkyvät yksittäiset tarkastelupisteet. Kahden peräkkäisen pisteen välinen etäisyys oli 50 m. Suurenoksessa on esitetty myös etäisyys tarkastelupisteestä Itätoukki-saarella olevaan tutkaheijastimeen. Reitin kokonaispituus oli 31 km. Kuvassa reitti on jaettu 5 km pituisiin segmentteihin. Vastaavaa osittelua on käytetty myöhemmin tulosgraafeissa.

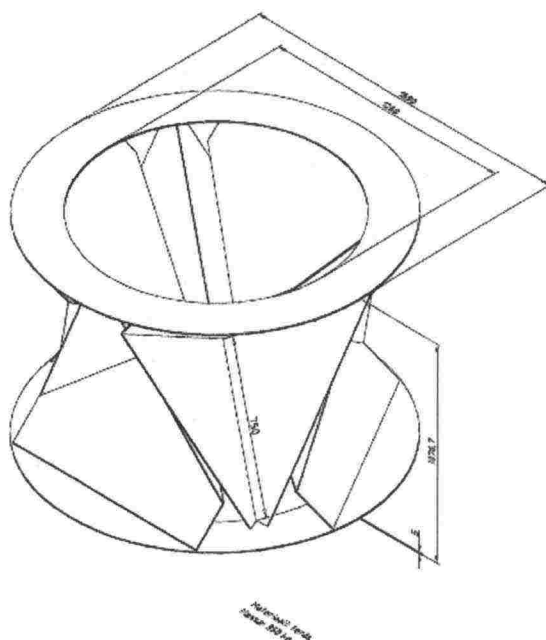


Kuva 3. Tarkastelureitti Vuosaaren väylällä. Reitille on merkitty punainen vaakaviiva 5 km välein. Nuoli ilmaisee kulkusuunnan.

Reitin lisäksi tutkaheijastimille laskettiin näkyvyysrasteri, jonka korkeus ja leveys oli 36 km ja resoluutio 50 m.

4 Tutkaheijastin- ja saarimallit

Tutkaheijastinmallin TH750 paino on 350 kg. Sinkityksen osuus kokonaispainoon on huomioitu mallintamalla kevennysaukot ylä- ja alalevyyn. Tutkaheijastimessa sopet ovat yhdessä kerroksessa. Soppeja on kuusi ja ne on sijoitettu heijastimeen vuorotellen kärki ylöspäin ja kärki alaspäin. Tutkaheijastimen kokonaiskorkeus on 1076 mm, joten se on aikaisemmin analysoituja malleja kookkaampi.



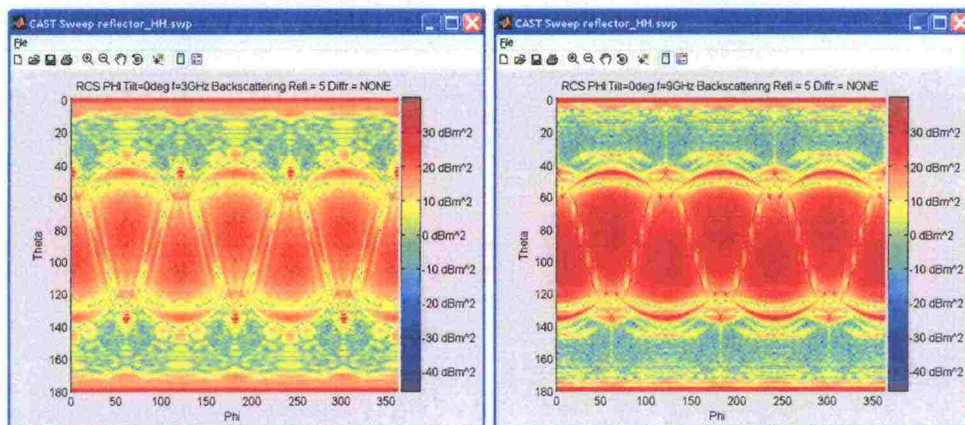
Kuva 4. Suunniteltu tutkaheijastinmalli TH750.

Tutkaheijastimen mitat ja ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

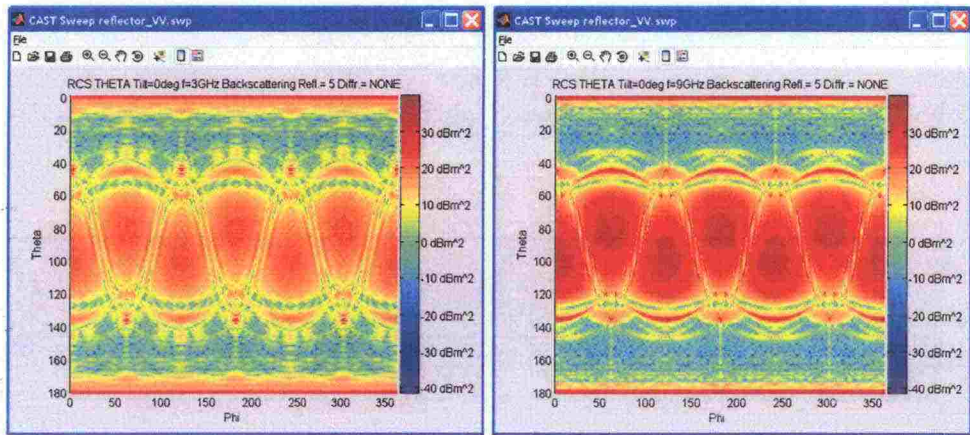
Taulukko 1. Tutkaheijastinmallin TH750 mitat ja ominaisuudet.

Korkeus	1076 mm
Ulkohalkaisija	1690 mm
Sisähalkaisija	1260 mm
Sopen korkeus	750 mm
Materiaali	teräs
Massa	350 kg

Tutkaheijastimelle laskettiin sirontakuviot 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla vaaka- (HH) ja pystypolarisaatiolla (VV). Kuvassa 5 on esitetty tulokset vaaka- polarisaation ja kuvassa 6 pystypolarisaation suhteen. Kuvissa pystykulma-arvo (theta) on määritelty siten, että 0-arvo vastaa tarkastelua suoraan ylhäältä. Kulma- arvot kasvavat siirryttäessä ylhäältä alaspäin aina 180°:een asti.

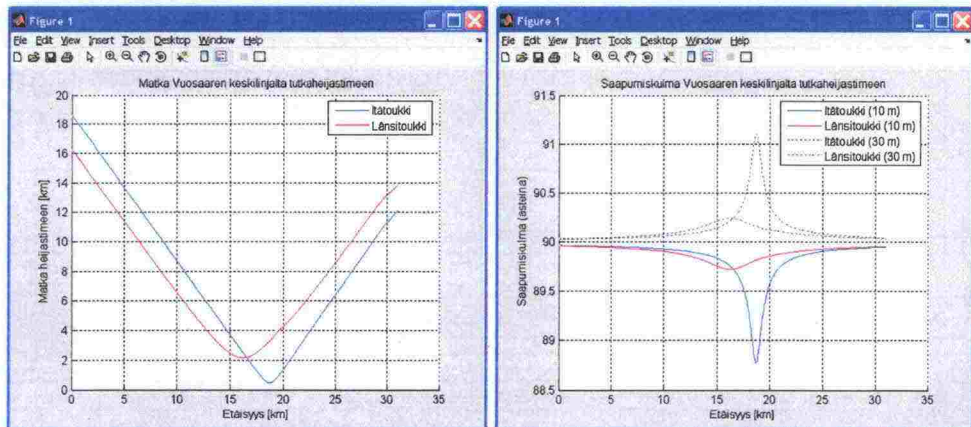


Kuva 5. Sirontakuviot HH-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.



Kuva 6. Sirontakuviot VV-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

Itätoukin ja Länsitoukin tapauksissa suunniteltu tutkaheijastinmalli kiinnitetään mastoon, joten tarkastelussa rajoituttiin kapeaan pystykulma-alueeseen. Sopivan kulma-alueen määrittelemiseksi laskettiin etäisyydet ja tutka-aallon saapumiskulmat Vuosaaren väylän keskilinjalta saariin eri tutkakorkeuksilla. Kuvassa 7 on esitetty tuloksena saadut etäisyydet ja saapumiskulmat.



Kuva 7. Tutkan ja heijastimen välinen etäisyys ja tutka-aallon saapumiskulma.

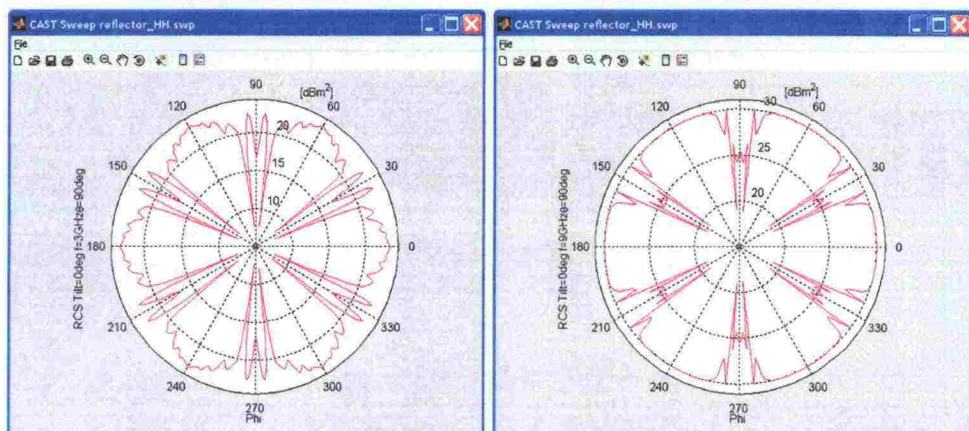
Etäisyysarvot tutkakorkeudella 10 m vaihtelevat Itätoukin tapauksessa välillä 0,5 km ja 18,6 km ja Länsitoukin tapauksessa välillä 2,2 km ja 16,2 km. Tällöin tutka-aallon saapumissuunnan pystykulma vaihtelee alle 1,5°. Tutkan korkeuden muuttaminen 10 metristä 30 metriin ei merkittävästi muuta etäisyyttä tai saapumiskulmaa. Taulukossa 2 on esitetty lasketut etäisyys- ja saapumiskulmavaihtelut. Kulmaerot Itätoukin tapauksessa ovat välillä 0,062° ja 2,3°. Vastaavat etäisyyserot 10 metrin korkeudesta heijastimeen sekä 30 m korkeudesta heijastimeen ovat välillä 0,00057 m ja 0,022 m.

Taulukko 2. Etäisyys- ja kulmavaihtelut.

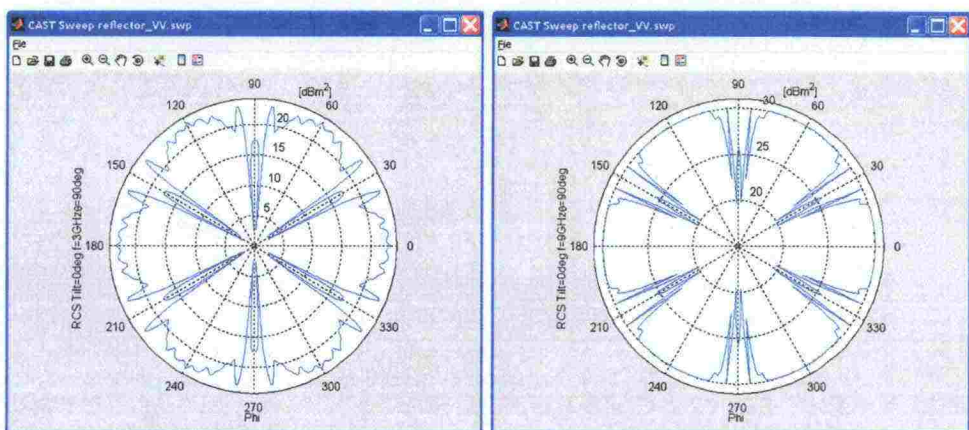
Malli	kulma_min [astetta] (h = 10 m)	kulma_max [astetta] (h = 10 m)	ero_min [astetta] (h = 10, 20, 30)	ero_max [astetta] (h = 10, 20, 30)
Itätoukki	88,78	89,97	0,062	2,325
Länsitoukki	89,73	89,96	0,071	0,522
Malli	etäisyys_min [m]	etäisyys_max [m]	ero_min [m]	ero_max [m]
Itätoukki	492,8	18629,0	0,00057	0,022
Länsitoukki	2197,3	16249,4	0,00066	0,005



Taulukko osoittaa, että riittävän tarkat sironta-arvot ovat luettavissa tutkaheijastimen sirontakuvioiden vaakaleikkauksista, jotka on esitetty kuvissa 8 ja 9.

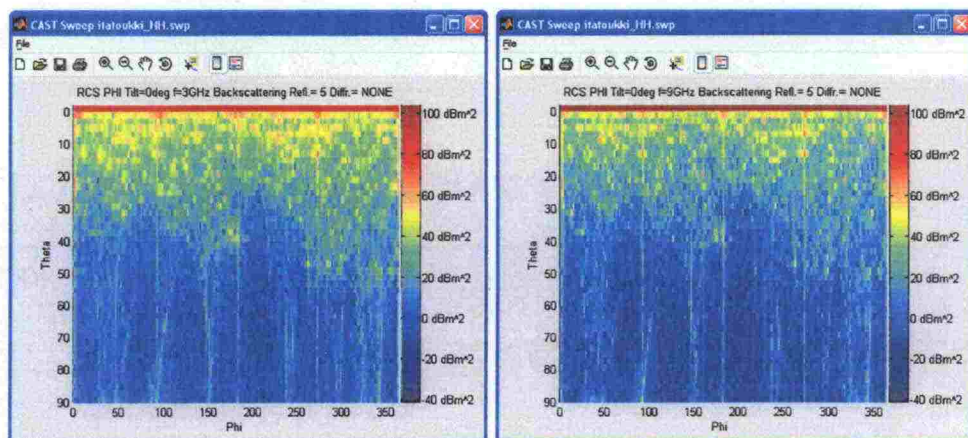


Kuva 8. Sirontakuvion vaakaleikkaus HH-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

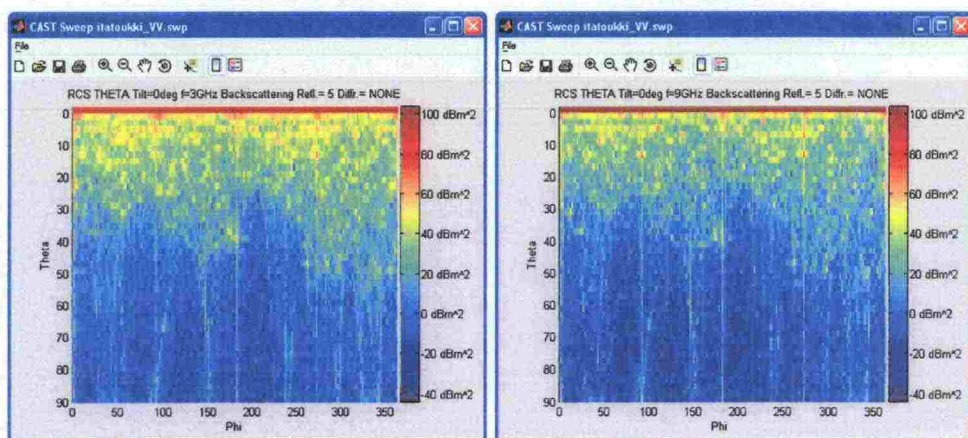


Kuva 9. Sirontakuvion vaakaleikkaus VV-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

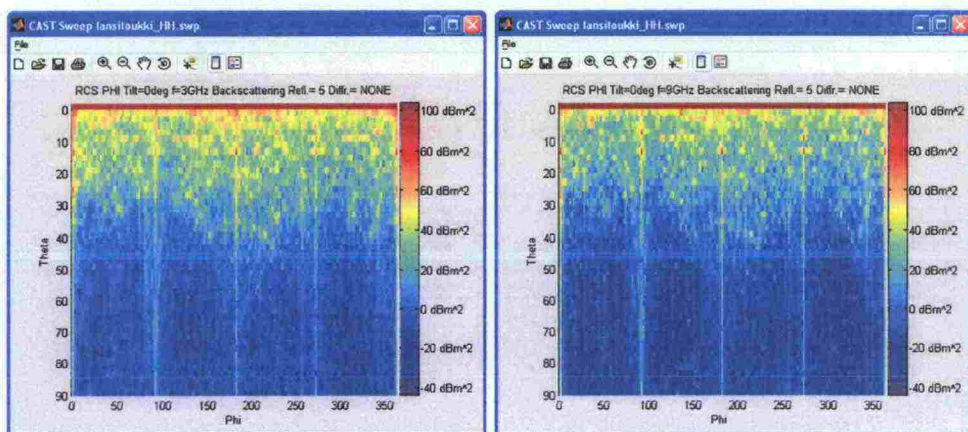
Myös Itätoukin ja Länsitoukin saarimalleille laskettiin sirontakuviot 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla vaaka- (HH) ja pystypolarisaatiolla (VV). Kuvissa 10 ja 12 on esitetty tulokset vaakapolarisaation ja kuvissa 11 ja 13 pystypolarisaation suhteen. Kuvissa pystyakselin arvo (theta) lasketaan vain 90°:een asti (vaakataso).



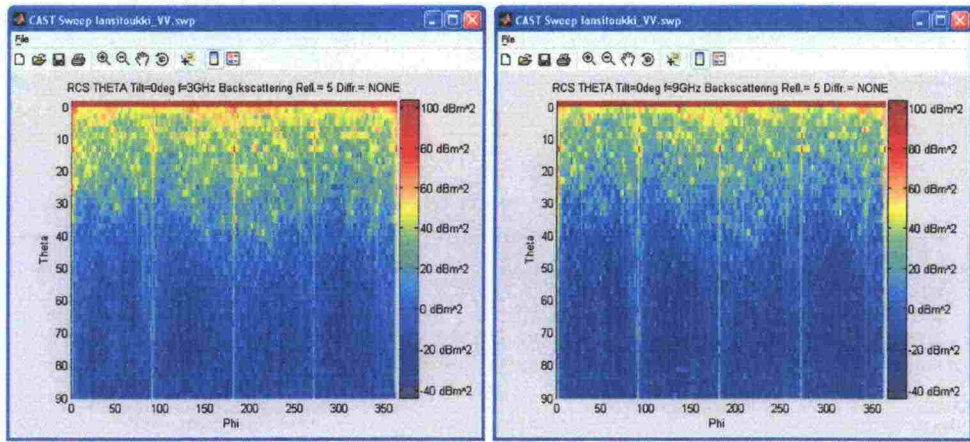
Kuva 10. Itätoukin sirontakuviot HH-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.



Kuva 11. Itätoukin sirontakuviot VV-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.



Kuva 12. Länsitoukin sirontakuviot HH-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.



Kuva 13. Länsitoukin sirontakuviot VV-polarisaatiolla 3 GHz:n ja 9 GHz:n tapauksissa.

Yllä olevista kuvista nähdään, että 0°-suunnassa (suoraan ylhäältä) saadaan yli 100 dBm² arvoja. Siirryttäessä lähemmäksi 90°-suuntaa (vaakatasoa) arvot putoavat -40 dBm² tasolle. Kun näitä tuloksia verrataan tutkaheijastimelle laskettuihin arvoihin (likimain 20 - 30 dBm² taso), voidaan olettaa, että saarten vaikutus tutkaherätteeseen vaakatasossa on pieni.

5 Menetelmät

Tutkaheijastimen näkyvyysalueen laskentaan toteutettiin kolme laskentamallia: pistesirottaja-, monisirottaja- ja hybridimalli. Tulosten analysointia varten toteutettiin kaksi laskenta-algoritmia, joista ensimmäinen huomioi vain tutkaheijastimen ja jälkimmäinen myös sijoitussaren vaikutuksen tutkanäkyvyyteen.

5.1 Laskentamallit

Laskentamalleissa huomioidaan tutkaheijastimen sirontakuvio, monitie-eteneminen vedenpinnasta ja etäisyysvaimennus. Tutkaherätearvot lasketaan normalisoituina tehosuhteina, jotta eri tutkien ominaisuudet, mm. lähetysteho ja vahvistukset, ovat myöhemmin huomioitavissa. Vastaanotetulle teholle on voimassa yleinen tutkayhtälö

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4},$$

missä P_r on tutkan vastaanottama teho [W], P_t tutkan lähetysteho [W], G tutka-antennin vahvistus [yksikötön], σ kohteen tutkapoikkipinta [m²], λ aallonpituus [m] ja R tarkasteluetaisyys [m]. Kun tutka-antennin vahvistus G on 1 ja lähetysteho P_t on 1, voidaan normalisoitu tehosuhte N esittää muodossa

$$N = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot F \sigma \cdot \frac{1}{R^4}.$$

Tutka-aallon etenemisvaimennus huomioidaan termillä $1/R^4$ ja monitie-etenemisen vaikutus kertomalla tutkapoikkipinta-ala σ efektiivisellä kertoimella F .



Mikäli tutkan vahvistus G ja lähetysteho P_t tiedetään, saadaan vastaanotettu teho P_r laskettua kaavasta

$$P_r = P_t G^2 N.$$

Tässä projektissa tutkaheijastimen tutkapoikkipinta-ala σ lasketaan VTT:llä kehitetyllä APO-menetelmällä (Antenna Theory applied to Physical Optics). Efektiivisen kertoimen F laskennassa käytetään erilaisia kirjallisuudesta löytyviä laskentamalleja.

5.1.1 Pistesirottajamalli

Tutkaheijastin voidaan mallintaa yksittäisellä sirottajalähteellä. Sen efektiivinen kerroin voidaan laskea lähteessä [5] esitetyllä menetelmällä. Jatkossa tästä mallista käytetään nimitystä pistesirottajamalli. Bistaattisessa tapauksessa (lähetin ja vastaanotin eri paikoissa) laskentamalli voidaan esittää seuraavalla lausekkeella

$$F = (1 + \rho_t^2 + 2\rho_t \cos \Psi_t)(1 + \rho_r^2 + 2\rho_r \cos \Psi_r),$$

missä ρ_t on heijastuskerroin vedenpinnasta lähettimen ja kohteen välillä ja ψ_t sen vaihe, ρ_r on vedenpinnan heijastuskerroin vastaanottimen ja kohteen välillä ja ψ_r sen vaihe. Vaihearvot saadaan kaavalla

$$\Psi_{t,r} = \phi_{t,r} + \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta R_{t,r},$$

missä ϕ on heijastuskertoimen vaihe ja ΔR on matkaero. Matkaerot määritellään seuraavasti:

$$\Delta R_{t,r} = \sqrt{(h_{t,r} + h)^2 + R_{t,r}^2} - \sqrt{(h_{t,r} - h)^2 + R_{t,r}^2},$$

missä $h_{t,r}$ on lähettimen/vastaanottimen korkeusero heijastimeen nähden, h heijastimen korkeus ja $R_{t,r}$ on lähettimen/vastaanottimen etäisyys heijastimeen xy-tasossa.

5.1.2 Monisirottajamalli

Saaren ja tutkaheijastimen voidaan ajatella muodostavan sirottajaryhmän. Sen efektiivinen kerroin voidaan laskea lähteessä [4] esitetyllä menetelmällä, josta jatkossa käytetään nimitystä monisirottajamalli. Siinä efektiivinen kerroin saadaan interpoloimalla vaihekulma koko sirottajaryhmän yli. Suurten mallien tapauksessa interpolointiväli on $[0, \dots, 2\pi]$ ja voidaan esittää seuraavalla lausekkeella



$$\begin{aligned}
F &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 + \rho_t^2 + 2\rho_t \cos \psi_t) (1 + \rho_r^2 + 2\rho_r \cos \psi_r) d\psi_t \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(1 + \rho_t^2 + 2\rho_t \cos \psi_t \right) \left(1 + \rho_r^2 + 2\rho_r \cos \left(\phi_r - \frac{h_r R_t}{h_t R_r} \phi_t + \frac{h_r R_t}{h_t R_r} \psi_t \right) \right) d\psi_t \\
&= 1 + \rho_t^2 + \rho_r^2 + \rho_r^2 \rho_t^2 + \frac{2\rho_r \left((1 + \rho_t^2) \left(\frac{h_r R_t}{h_t R_r} \right)^2 - 1 - \rho_t^2 \right) \cos \left(\phi_r + \frac{h_r R_t}{h_t R_r} (\pi - \phi_t) \right) \sin \left(\frac{h_r R_t}{h_t R_r} \pi \right)}{\left(\left(\frac{h_r R_t}{h_t R_r} \right)^2 - 1 \right) \frac{h_r R_t}{h_t R_r} \pi}
\end{aligned}$$

missä ρ_t on heijastuskerroin vedenpinnasta lähettimen ja heijastimen välillä ja ϕ_t on heijastuskertoimen vaihe, h_t lähettimen korkeus, R_t lähettimen etäisyys heijastimesta, ρ_r on vedenpinnan heijastuskerroin lähettimen ja heijastimen välillä ja ϕ_r sen vaihe, h_r on vastaanottimen korkeus ja R_r vastaanottimen etäisyys heijastimesta.

Monostaattisessa tapauksessa (lähetin ja vastaanotin samassa paikassa) kaava supistuu yksinkertaiseen muotoon

$$F = 1 + 4\rho^2 + \rho^4.$$

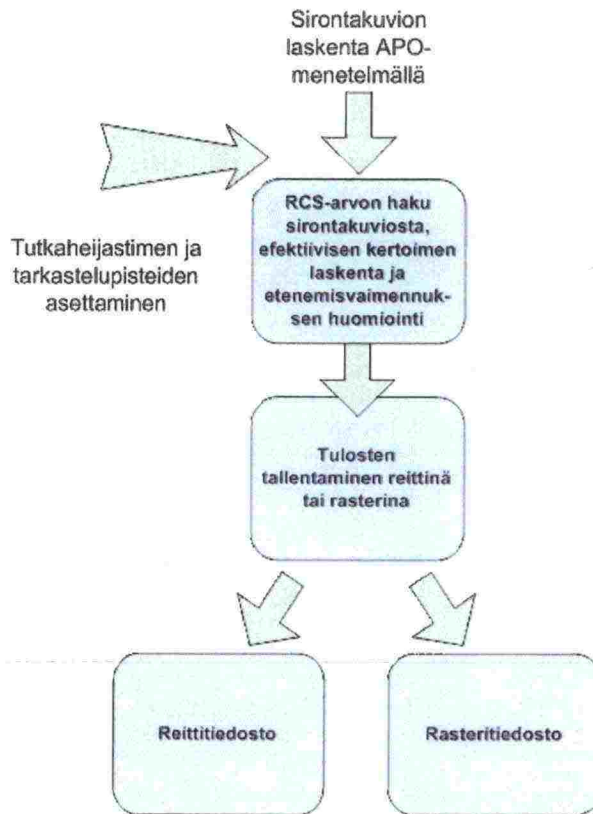
5.1.3 Hybridimalli

Hybridimallissa käytetään edellä mainittuja malleja samanaikaisesti siten, että pienet kohteet lasketaan pistesirottajamallilla ja suuret monisirottajamallilla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että heijastimen efektiivinen kerroin lasketaan pistesirottajamallilla ja saarimallin kerrosten kertoimet monisirottajamallilla.

5.2 Laskenta-algoritmit

5.2.1 Ilman saarivaikutusta

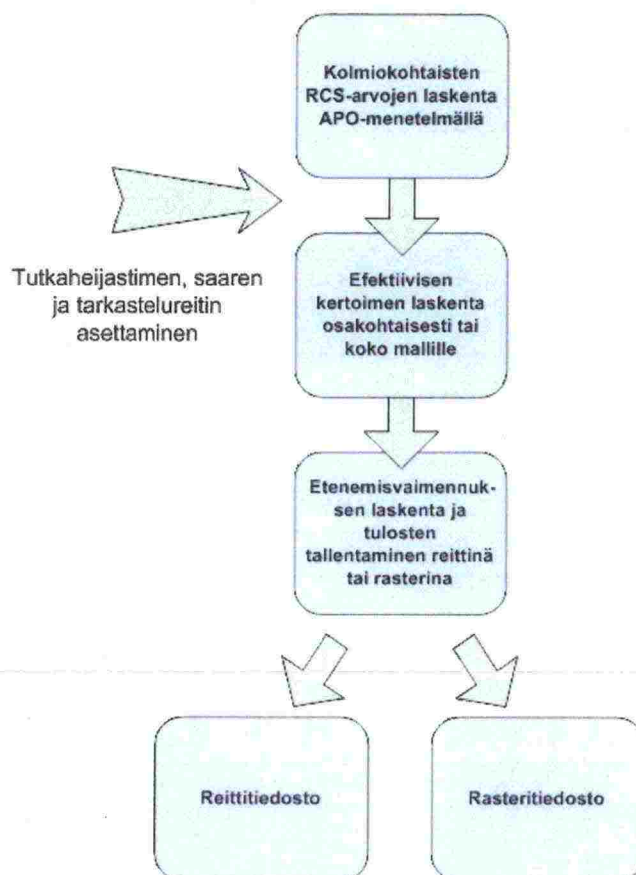
Tulosten analysointia varten tehtiin referenssilaskennat ilman saarimallia, koska käytössä ei ollut todellisia mittaustuloksia. Referenssitulosten laskentaan toteutettiin laskenta-algoritmi, jota varten laskettiin etukäteen tutkaheijastimen sirontakuviot eri taajuuksilla ja polarisaatioilla. Algoritmin alussa määritellään tutkaheijastimen ja tarkastelupisteiden sijainnit. Näiden tietojen avulla haetaan tutkapoikkipinta-arvot tutkaheijastimen sirontakuviosta. Seuraavaksi tämä arvo kerrotaan pistesirottajamallilla lasketulla efektiivisellä kertoimella ja saadusta tuloksesta vähennetään heijastimen ja tarkastelupisteen välisestä etäisyydestä aiheutuva etenemisvaimennus. Lopuksi tulokset tallennetaan laskentatapauksesta riippuen joko reitti- tai rasteritiedostoihin. Kuvassa 14 on esitetty vuokaavio laskenta-algoritmista.



Kuva 14. Laskenta ilman saarivaikutusta.

5.2.2 Saarivaikutuksen kanssa

Analysoitavat tutkanäkyvyyslaskennat tehtiin saarimallien kanssa. Tässä algoritmossa huomioidaan saaren geometrian vaikutus, joten tutkaheijastimen sirontakuviota ei enää voida laskea etukäteen. Tutkaheijastin, saari ja tarkastelupiste muodostavat yhden kokonaisuuden. Algoritmin alussa määritellään tutkaheijastimen, saaren ja tarkastelupisteiden sijainnit. Seuraavaksi lasketaan tutkaheijastimelle ja saaren osille tutkapoikkipinta-arvot. Tapauksesta riippuen osien arvot summataan keskenään tässä vaiheessa tai vasta efektiivisen kertoimen laskennan jälkeen. Ensiksi mainitussa efektiivinen kerroin lasketaan koko mallille ja jälkimmäisessä tapauksessa jokaiselle osalle erikseen. Kertoimen laskennassa käytetään vaihtoehtoisesti pistesirottaja-, monisirottaja- tai hybridimallia. Eri osien tutkapoikkipinta-arvojen summauksessa huomioidaan osien välille syntyvät matkaerot. Lopuksi arvoista vähennetään etenemisvaimennuksen vaikutus ja tulokset tallennetaan laskentatapauksesta riippuen reitti- tai rasteritiedostoihin.

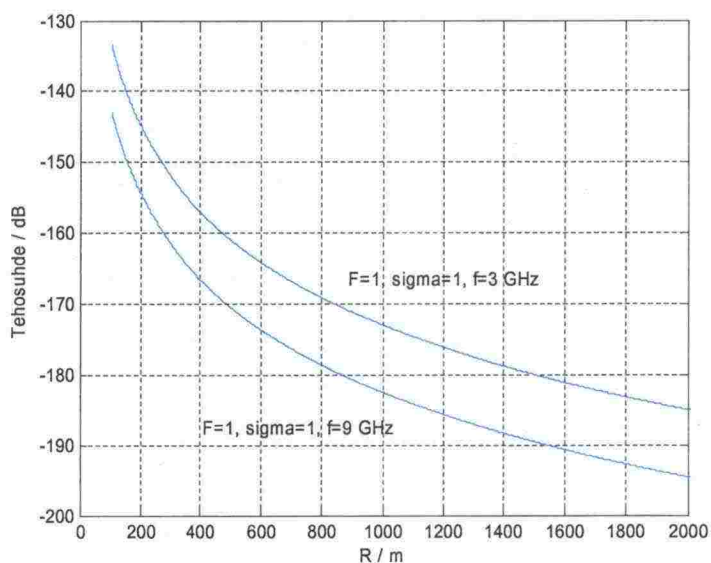


Kuva 15. Laskenta saarivaikutuksen kanssa.

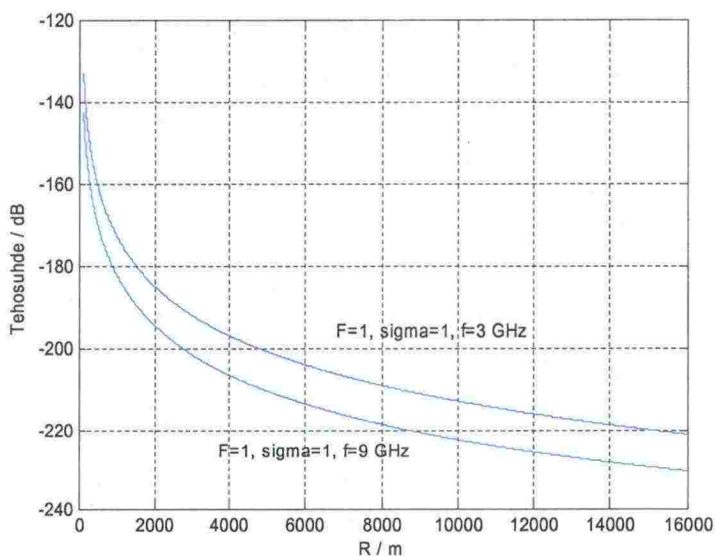
6 Laskennat

6.1 Laskentaparametrit

Tarkastelurajojen lähtökohdaksi otettiin efektiivinen ympärisäteilevä teho (EIRP, Effective-Isotropic-Radiated-Power) ja etäisyysrajaksi minimietäisyys Itätoukki-saaresta Vuosaaren väylän keskilinjaan. Tehosuhteelle laskettiin eri etäisyyksillä tehosuhtekäyrä, joka on esitetty kuvissa 16 ja 17.



Kuva 16. EIRP-tehosuhde 0 - 2 km.



Kuva 17. EIRP-tehosuhde 0 - 16 km.

Tehosuhteen arvo 500 m päässä heijastimesta on 3 GHz:n taajuudella likimain -160 dB ja 9 GHz:n taajuudella -170 dB. Tutkan mittausdynamiikka-alueen arvioitiin olevan 50 dB. Suunnitellun tutkaheijastimen tutkapoikkipinnan maksimiarvoksi vaakaleikkauksessa 3 GHz:n taajuudella saatiin noin 20 dBm^2 ja 9 GHz:n taajuudella 30 dBm^2 . Näiden perusteella tulosten tarkasteluväliksi asetettiin arvoväli -140 dB .. -190 dB.

Laskennassa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 3.



Taulukko 3. Laskentaparametrit.

Laskentaparametri	Arvo
Heijastimen alareunan korkeus vedenpinnasta	20 m
Tutkan korkeus	10 m, 20 m ja 30 m
Laskentaresoluutio	50 m
Rasterin koko	36 km x 36 km
Laskentataajuuudet	3 GHz ja 9 GHz
Sirontamoodi	monostaattinen
Polarisaatiot	HH ja VV
Heijastukset	5
Laskentamalli	pistesirottaja, monisirottaja ja hybridi
Laskentadynamiikka	-140 .. -190 dB
Minimietäisyys	500 m
Heijastimen kääntökulma	10° (vastapäivään)

6.2 Laskentatapaukset

Laskentatapaukset jaettiin kolmeen ryhmään: referenssilaskennat, laskennat Itätoukki-saarella ja laskennat Länsitoukki-saarella. Referenssilaskennoissa käytettiin vain heijastinta ja laskentamallina oli pistesirottajamalli. Muissa laskentatapauksissa tarkasteltiin 1) vain heijastinta, 2) vain saarta ja 3) saarta ja heijastinta. Laskentamalleina käytettiin kaikkia kolmea laskentamallia. Analysoidut laskentatapaukset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Laskentatapaukset.

Kohde	Tapaus
Referenssi (ei saarta)	pistesirottajamalli (vain heijastin)
Itätoukki	pistesirottajamalli (vain heijastin) pistesirottajamalli (vain saari) pistesirottajamalli (saari ja heijastin)
	monisirottajamalli (vain saari) monisirottajamalli (saari ja heijastin)
	hybridimalli (saari ja heijastin)
Länsitoukki	pistesirottajamalli (vain heijastin) pistesirottajamalli (vain saari) pistesirottajamalli (saari ja heijastin)
	monisirottajamalli (vain saari) monisirottajamalli (saari ja heijastin)
	hybridimalli (saari ja heijastin)

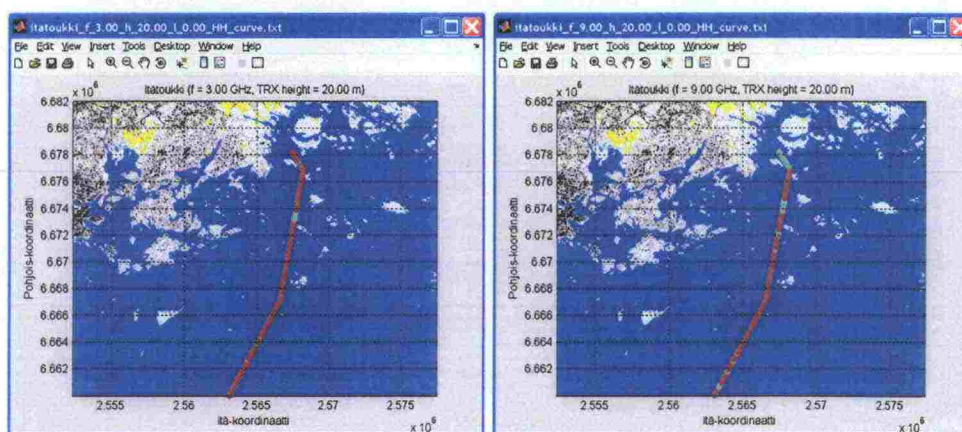
Näiden lisäksi Itätoukin yhteydessä tarkasteltiin, miten kohtisuora kallioleikkaus ja saaren materiaalin vaihtaminen vaikuttaa laskentatuloksiin.



6.3 Laskentatulokset

Laskentatapauksen tulokset on esitetty liitteessä ja ne on tallennettu numeerisessa muodossa CD:lle yhdessä tulosten analysointiin käytettyjen Matlab-skriptien kanssa. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi esimerkkejä laskentatuloksista ja niissä havaituista piirteistä. Laskentakohteena kaikissa tapauksissa on Itätoukisaari. Tarkastelureitti on pitkin Vuosaaren väylän keskilinjaa 50 m resoluutiolla.

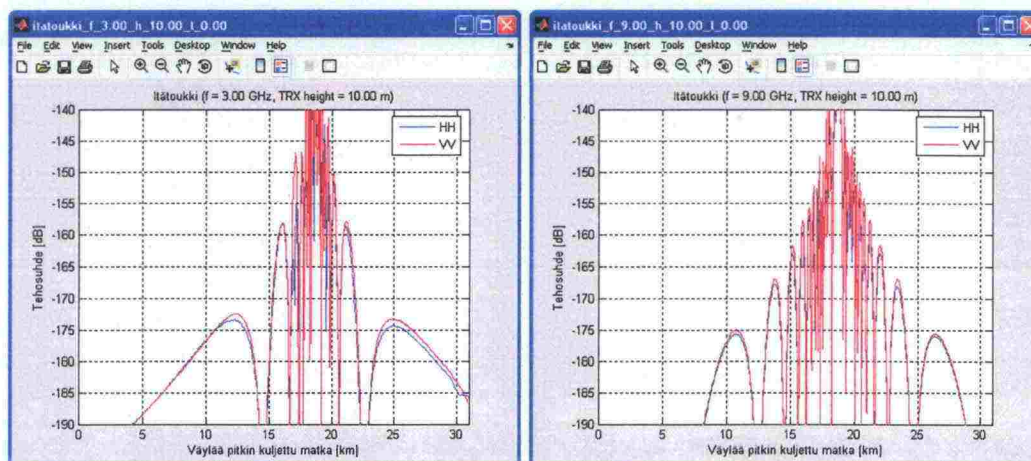
Laskentatulokset esitetään siten, että x-akselilla on väylää pitkin kuljettu matka kilometreinä ja y-akselilla normalisoitu tehosuhte desibeleinä. Kuvassa 18 on esitetty laskentatulokset siten, että vaaleanvihreällä värillä ilmaistaan ne kohdat, missä tietty raja-arvo (-190 dB) alitetaan.



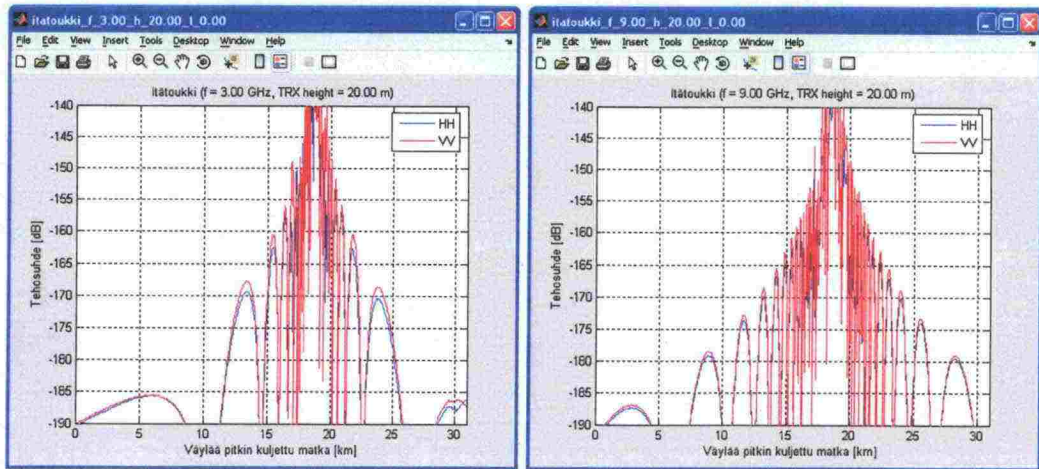
Kuva 18. Tulokset hybridimallilla 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ja tutkakorkeudella 20 m. Vaaleanvihreissä pisteissä tehosuhte alittaa raja-arvon.

6.3.1 Vain heijastin

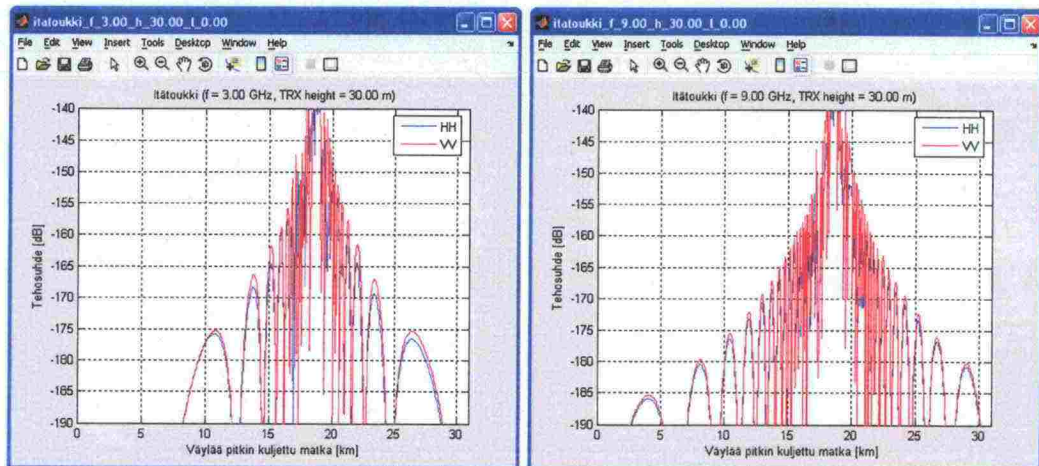
Ensimmäisenä esimerkkinä on pelkästään heijastimelle lasketut tulokset. Kuvissa 19 - 21 tehosuhtekäyrät on esitetty S- ja X-alueella tutkakorkeuksilla 10 m, 20 m ja 30 m.



Kuva 19. Tehosuhtekäyrät 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla 10 m tutkakorkeudella.



Kuva 20. Tehosuhdekäyrät 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla 20 m tutkakorkeudella.

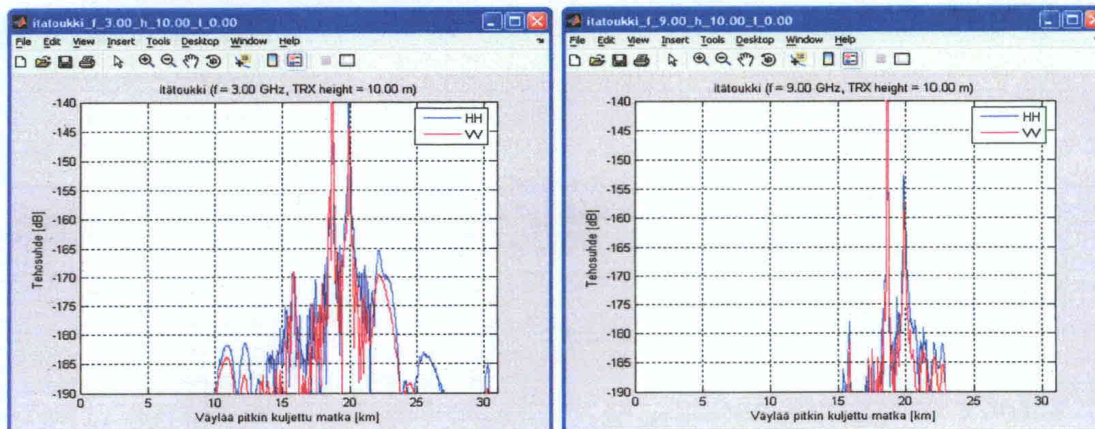


Kuva 21. Tehosuhdekäyrät 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla 30 m tutkakorkeudella.

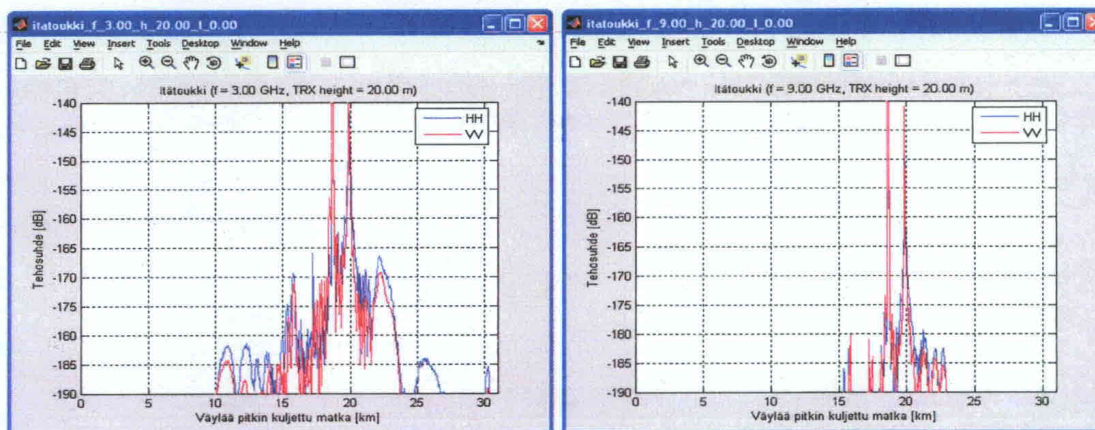
Tuloksista voidaan havaita, että reitille syntyy minimikohtia aikaisemmassa tutkimusraportissa [2] esitetyllä tavalla. Tutkan asennuskorkeudella on vaikutusta minimikohtien sijaintiin, muttei tehotasoon. Minimikohtien määrä 9 GHz:n taajuudella on suurempi kuin 3 GHz:n taajuudella. Käytetty polarisaatio vaikuttaa tehotasoon ja minimikohtien sijaintiin. Minimikohdat eri polarisaatioilla ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan. Tehovaihtelut VV-polarisaatiolla ovat suurempia kuin HH-polarisaatiolla.

6.3.2 Vain saari

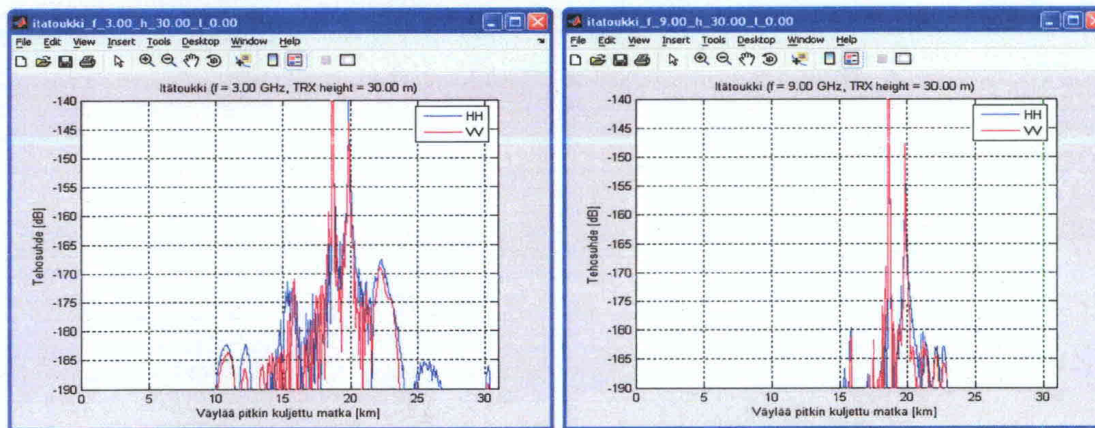
Seuraavassa esimerkissä on vain Itätoukki-saarelle lasketut tulokset. Efektiivisen kertoimen laskennassa on käytetty monisirottamallia.



Kuva 22. Tehosuhtekäyrät 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla 10 m tutkakorkeudella.



Kuva 23. Tehosuhtekäyrät 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla 20 m tutkakorkeudella.



Kuva 24. Tehosuhtekäyrät 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla 30 m tutkakorkeudella.

Tuloksista havaitaan tehotasojen olevan selvästi referenssilaskennan tuloksia alhaisempia. Matalammat arvot johtuvat osittain siitä, että saarta mallintavat pintakolmiot ovat suuria ja tutka-aalto osuu niihin hyvin viistosti. Täten vain pieni osa tutka-aallon tehosta siroaa takaisinpäin. Lisäksi materiaalina käytetyn kiven



heijastuskerroin on pienempi kuin tutkaheijastimessa käytetyn teräksen. Kuvista on lähes mahdotonta ennustaa minimikohtien paikkoja. Länsitoukin tapauksessa tehotasot olivat vielä selvemmin heijastimen tehotasoja alhaisempia.

6.3.2.1 Leikattu saarimalli

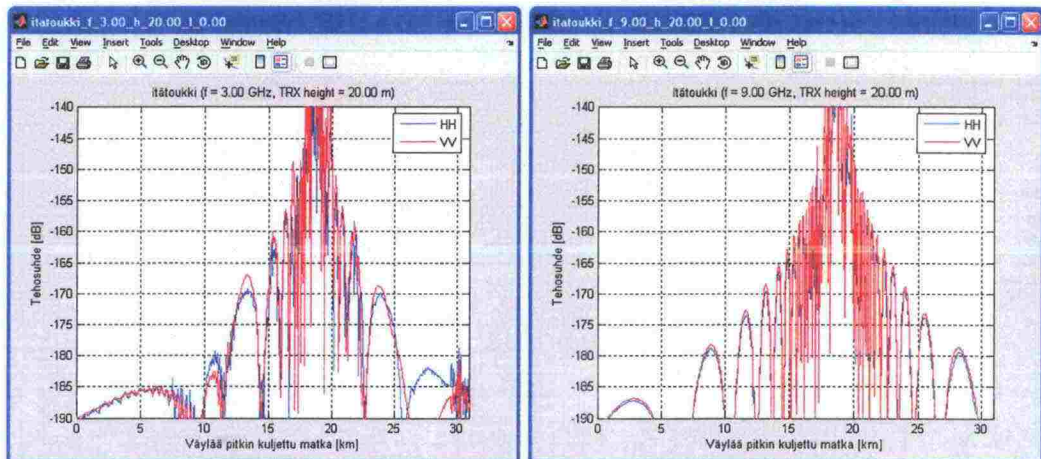
Tulosten perusteella oli selvää, että laskentamallin antamat ennusteet saarten tutkavasteille olivat todellista alhaisempia. Saaren geometrian vaikutuksen arvioimiseksi tarkasteltiin myös tapausta, jossa saaren tutkaherätettä maksimoitiin. Tämä tehtiin leikkaamalla Itätoukki-saareen pystysuora seinämä ja laskemalla tulokset uudelleen. Uusi tarkastelureitti asetettiin siten, että tutka-aallon saapumissuunta vaakatasossa oli aina kohtisuorassa kallioleikkausta vastaan.

Seuraavaksi tarkasteltiin materiaalin vaikutusta tuloksiin. Saaren materiaali vaihdettiin teräkseksi ja laskennat toistettiin. Materiaalin muuttaminen kasvatti tehotasoa etenkin 9 GHz:n taajuudella. Tämä oli odotettua, koska materiaalin sähkömagneettiset ominaisuudet riippuvat taajuudesta.

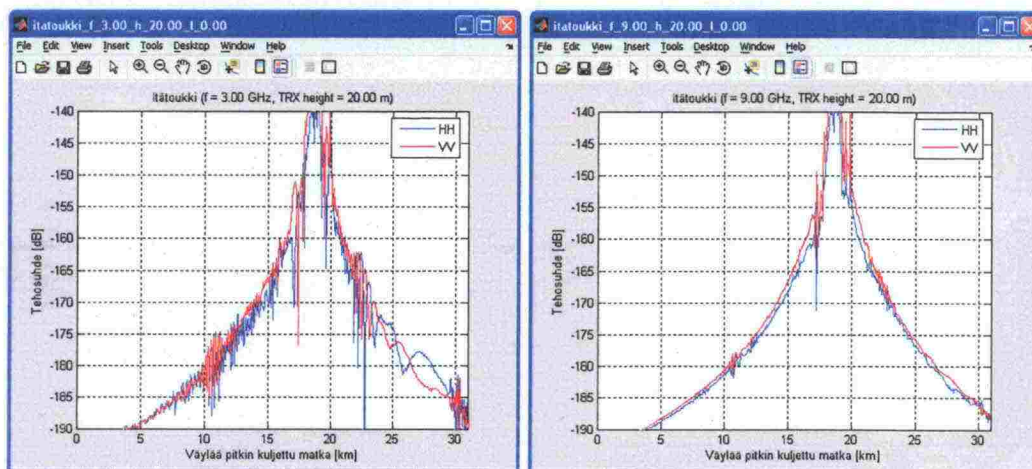
Saaren geometriallla ja materiaalivalinnoilla voidaan odotetusti muuttaa havaittua tehotasoa, mutta muutoksen oikeellisuutta ei voida arvioida ilman todellisia mittauksia.

6.3.3 Heijastin ja saari

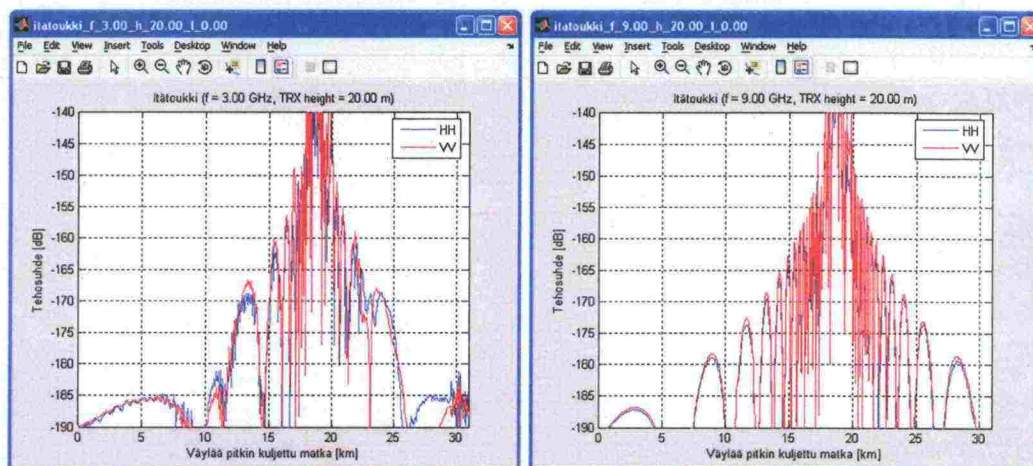
Lopuksi esitellään esimerkkejä heijastimen ja saaren tutkanäkyvyyden mallintamisesta saaduista tuloksista. Efektiivisen kertoimen laskennassa on käytetty eri laskentamalleja. Kuvissa 25 - 27 tulokset on esitetty laskentamalli-kohtaisesti 20 m tutkakorkeuden tapauksessa.



Kuva 25. Tulokset pistesirottajamallilla 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ja tutkakorkeudella 20 m.



Kuva 26. Tulokset monisirottajamallilla 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ja tutkakorkeudella 20 m.



Kuva 27. Tulokset hybridimallilla 3 GHz:n ja 9 GHz:n taajuuksilla ja tutkakorkeudella 20 m.

Pistesirottajamallin tuloksissa esiintyy paljon minimi- ja maksimikohtia, kun taas monisirottajamallin tuloksissa yksittäisten sirottajien aiheuttamat minimikohdat katoavat ja tuloksena on tasaisempi tehosuhteikäyrä. Molemmissa tapauksissa tehosuhteearvot pysyvät keskimäärin samalla tasolla. Hybridimallilla lasketuissa tuloksissa näkyy selvästi pistesirottajamallin vaikutus.

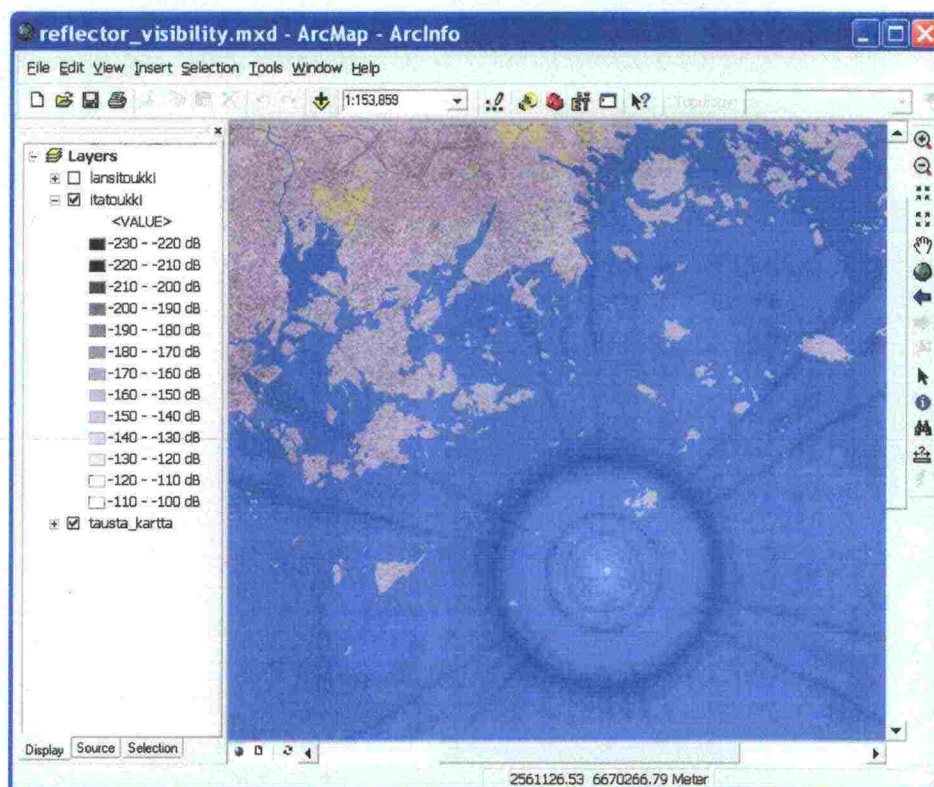
7 Jatkokehityskohteita

7.1 Tulosten esitys GIS-ohjelmistolla

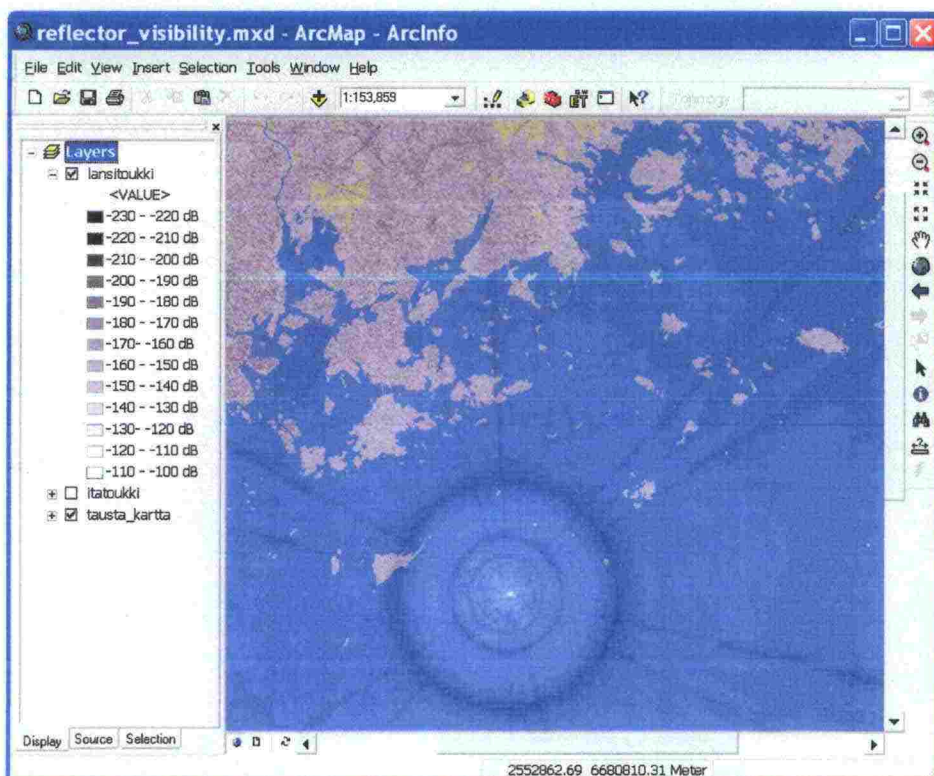
Tehosuhteearvojen lisäksi tulostiedostoihin tallennettiin myös maantieteelliset koordinaatit, jotta tuloksia olisi helpompi käsitellä digitoitujen karttojen päällä. Rasterilaskentojen tulokset talletettiin sekä numeerisessa muodossa että tiff-kuvina. Numeerisen muodon etuna on se, että aineistoa voidaan vapaasti muokata. Kuvamuodossa tallennuksen etuna on pienempi muistinkulutus. Tästä on etua, jos useita tulosrastereita halutaan esittää samanaikaisesti. Rastereiden pikselit on kohdistettu, joten niiden esittäminen päällekkäin on vaivatonta. Alla olevissa kuvissa 28 ja 29 on esimerkki tulosrasterien esittämisestä ArcGIS-



ohjelmistossa. ArcMap-komponenttiin on ladattu Itätoukin ja Länsitoukin tulorasterit sekä taustakartta. Tulokset on laskettu 3 GHz:n taajuudella 10 m tutkakorkeudella ja HH-polarisaatiolla. Rasteri on asetettu osittain läpikuultavaksi, jotta myös taustakartta näkyisi. Kuvassa näkyvä tumma rengasalue on tutkaheijastimen tutkavasteessa esiintyvä minimikohta-alue.



Kuva 28. Itätoukin tutkanäkyvyysrasterin esitys ArcGIS-ohjelmistolla.

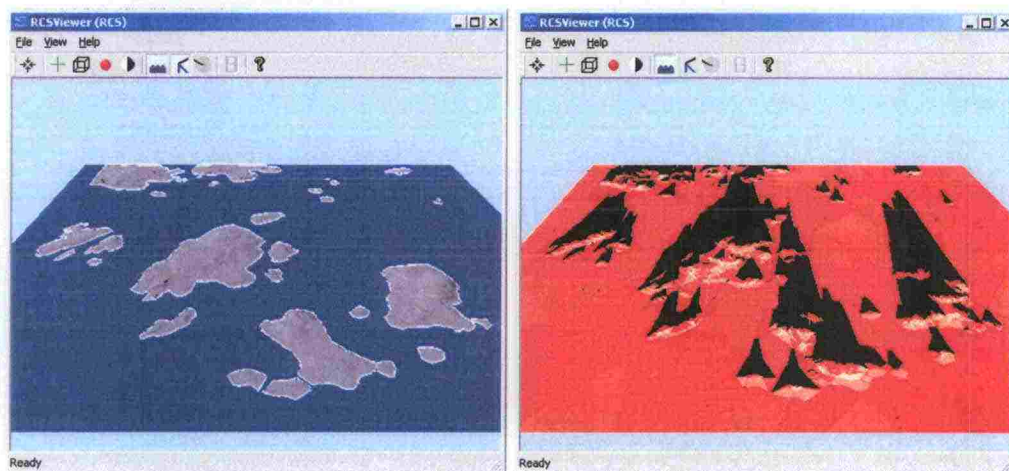


Kuva 29. Länsitoukin tutkanäkyvyysrasterin esitys ArcGIS-ohjelmistolla.

On hyvin todennäköistä, että ajan myötä ylläpidettäviä rastereita ja reittejä kertyy paljon. Niiden hallinta vaatii suunnittelua ja yksi tapa olisi tallentaa ne tietokantaan. Siten muut ohjelmistot voivat hakea niitä käyttöönsä tarpeen mukaan. Kaupallisissa GIS-ohjelmistoissa on valmiit rajapinnat tietokantahakuihin mm. Oracle-tietokannasta. Toinen tapa hallita tulostiedostoja on tallentaa ne keskitettyyn paikkaan esim. levypalvelimelle.

7.2 Ympäristön huomiointi

Edellisessä luvussa esitetyissä tuloksissa huomioitiin vain heijastimen ja saaren vaikutus. Suomen rannikko on kuitenkin hyvin saaristoista ja saaret synnyttävät katvealueita tutkamerkin näkyvyyteen. Lisäksi niillä on vaikutusta laivan havaitsemaan tutkaherätteeseen jopa siinä määrin, että tutkamerkin heräte voi hävitä siihen. Parempi vastaavuus todellisuuteen saataisiin huomioimalla tutkamerkin lähellä olevien saarten vaikutus. Tämä vaatii kuitenkin niiden kolmiulotteisen mallintamisen. Projektin aikana kokeiltiin 3D-mallin luontia Maanmittauslaitokselta saadusta näyteaineistosta. Tämä aineisto sisälsi korkeuskäyrä- ja rantaviivatietoa, josta muodostettiin 3D-kolmioverkko tutkapoikkipinnan laskentaohjelmistoa varten. Kuvassa 30 on esitetty generoitu 3D-malli ja esimerkki tutkapoikkipinnan laskennan tuloksista.



Kuva 30. Katvealueiden ennustaminen saaristoalueella.

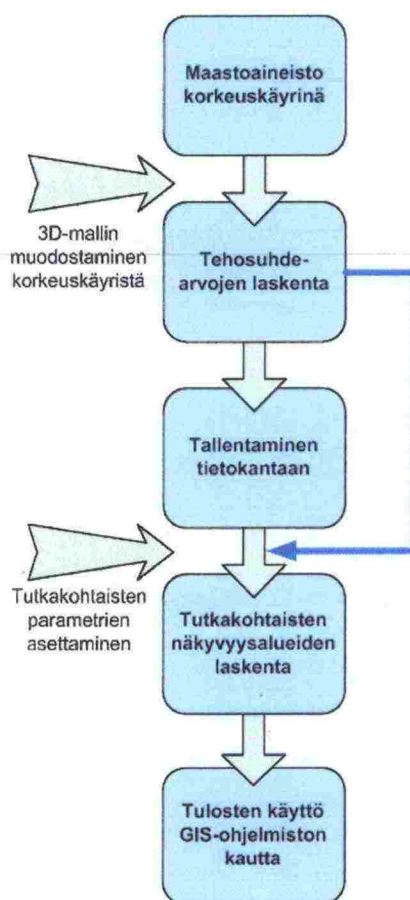
Kuvassa saaret vaikuttavat laskentatuloksiin kahdella tavalla. Ensiksikin, saaret muodostavat katvealueita (mustat alueet), joiden koko ja muoto riippuu saaren geometriasta ja tutkan sijainnista. Toiseksi, saaret synnyttävät oman tutkaherätteensä. Oikeanpuoleisessa kuvassa valkoisina alueina näkyvät saariin muodostuneet luonnolliset sopet.

7.3 Tutkanäkyvyyslaskentojen automatisointi

Tutkanäkyvyysrastereiden tai -käyrien hyödyntäminen suuremmassa mittakaavassa vaatii ympäristön automaattista 3D-mallintamista. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi Maanmittauslaitoksen tuottamasta korkeuskäyrä- ja rantaviiva-aineistoista. 3D-mallin luonti vaatii ohjelmistokomponentin, joka lukee korkeuskäyrät ja generoi niistä laskentaan sopivan kolmioverkon. Suurin ongelma 3D-ympäristön luonnissa on mallinnukseen riittävän kolmiomäärän löytäminen sekä aineistossa esiintyvien virheiden poistaminen.



Automatisoitu tutkanäkyvyyden laskenta voidaan esittää toimintaketjuna, jonka osat voivat olla osittain tai täysin automatisoituja. Lähtökohdaksi tarvitaan aineisto, josta 3D-malli luodaan. Seuraavassa vaiheessa tutkan ja turvalaitteen sijaintitietojen ja laskentaparametrisettien avulla lasketaan tehosuhterasterit ja -reitit. Tuloksissa huomioidaan ympäristön aiheuttamat katvealueet. Tulokset tallennetaan tietokantaan, josta muut ohjelmistot voivat hakea ne. Talletettujen tietojen avulla voidaan esimerkiksi laskea turvalaittekohtaisia näkyvyysalueita laitekohtaisten parametrien avulla. Nämä tulokset voidaan tallentaa takaisin tietokantaan tai esittää suoraan jollakin GIS-ohjelmistolla. Kuvassa 31 toimintaketju on esitetty vuokaaviona.



Kuva 31. Tutkanäkyvyysrastereiden laskenta.

8 Johtopäätökset

Laskentatulokset tukevat sitä, että suunniteltu tutkaheijastinmalli toimii hyvin Itätoukki- ja Länsitoukki-saarella. Suuri soppikoko mahdollistaa hyvän tutkavasteen kaikkiin suuntiin. Soppien reunoilla esiintyy kapeita minimikohtia, mutta yhtenäisiä minimialueita ei sirontakuviin synny. Monitie-etenemisen johdosta yksikerroksisen heijastimen tutkanäkyvyysalueeseen syntyy minimikohtia tietyille etäisyyksille, joiden paikka voidaan laskennallisesti ennustaa. Minimikohdat voidaan poistaa käyttämällä 2-kerroksisia soppeja, joissa kerrosten väli on suhteessa käytettävään aallonpituuteen [6]. Saarille sijoitetuissa turvalaitteissa minimikohtia ei välttämättä esiinny, koska saarella on vaikutusta tutkaheijastimen sirontakuviin. Laskentatulosten perusteella kirjallisuudesta



löytyvän pistesirottajamallin voidaan olettaa soveltuvan hyvin kelluvien ja merellä olevien kiinteiden tutkaheijastinten tutkanäkyvyyden arvioitiin. Sitä vasten saarilla käytettyjen tutkaheijastinten tutkanäkyvyyttä on vaikea ennustaa. Saarten mallinnuksessa tehdyt yksinkertaistukset aiheuttavat virhettä ja käytetyt laskentamallit eivät välttämättä anna todellista kuvaa kaarevien pintojen tutkavasteesta. Virheitä voidaan pienentää käyttämällä suurempaa määrää kolmioita kaarevien muotojen mallintamisessa. Sen seurauksena osa kolmioista on pystymässä tutka-aallon saapumissuuntaan nähden. Lisäksi pienempi kolmiokoko tuottaa leveämmän sirontakuvion. Täten takaisinsirontasuuntaan syntyy todennäköisesti suurempi tutkaheräte. Asian käänköpuoli on se, että suurempi kolmiomäärä johtaa pitempään laskenta-aikaan ja suurempaan muistinkulutukseen.

Mallinnuksen kehittäminen vaatii mittausten tekoa. Vain niiden avulla voidaan laskentamallien soveltuvuutta arvioida ja kehittää. Selkeitä jatkokehityskohteita ovat ympäristön aiheuttamien katvealueiden huomiointi sekä tulosten verifiointi mittauksilla tai ITU-R:n suosittamia laskentamalleja vasten. Niiden heikkoutena on se, että ne ovat tilastollisia ja niiden soveltuvuutta Suomen rannikkolosuhteisiin on vaikea arvioida.

9 Yhteenveto

Projektin tulokset osoittavat, että tutkaheijastimen näkyvyysalue on mahdollista mallintaa. Sen tarkkuutta ei kuitenkaan kyetä arvioimaan ilman todellisia mittauksia. Laskentatulosten vertailu osoitti, että pistesirottajamalli soveltuu kelluvien tai merenpohjaan kiinnitettyjen kiinteiden turvalaitteiden tutkanäkyvyysalueen ennustamiseen. Monisirottajamallilla on mahdollista approksimoida saarelle asennettujen turvalaitteiden näkyvyyttä, mutta tuloksiin liittyy enemmän epävarmuustekijöitä. Niiden selvittäminen vaatii mittauksia. Projektin tulokset osoittavat, että menetelmäkehitykselle olisi myös tarvetta. Kaikkia etenemisympäristöön liittyviä tekijöitä mm. katvealueita ei nykyisessä mallinnuksessa huomioida. Ympäristön mallintaminen tuo mukanaan omat haasteensa, mutta ne ovat ratkaistavissa. Lisäksi tutkien ja turvalaitteiden tekniset ominaisuudet vaikuttavat tutkanäkyvyyteen ja tämä osaltaan vaatii selvitystyötä.

Projektissa kehitettyä laskentamallia voidaan hyödyntää turvalaitteiden paikkojen suunnittelussa ja yleisestikin erilaisten tutkien näkyvyyden estimoinnissa. Tutkanäkyvyysrasterien avulla turvalaitteet voidaan sijoittaa siten, ettei eri taajuusalueilla tai polarisaatioilla synny minimikohtia väylän käänköpaikkoihin. Mikäli tietoa ympäröivistä saarista on saatavilla, voidaan myös saarten aiheuttamien katvealueiden vaikutus huomioida. Erilaisten tutkalaitteiden näkyvyys voidaan estimoida väylän eri kohdissa erilaisilla antennivahvistus-, lähetysteho-, korkeus-, taajuus- ja polarisaatioarvoilla ilman mittauksia.



Lähdeviitteet

- [1] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastimien analysointi, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 3.9.2004, 39 s.
- [2] Hujanen, A., Backman, W., Tuomimäki, L., Toivanen, H., Horsmanheimo, S., Tutkaheijastinprototyypin laskenta, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 20.4.2005, 61 s.
- [3] <http://www.vtt.fi/cast>
- [4] Long M. W., Radar Reflectivity of Land and Sea, 3. painos, Artech House, 2001.
- [5] Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T., Radar Cross Section, 2. painos, Artech House, 1993.
- [6] Hujanen, A., Backman, W., Toivanen, H., Tuomimäki, L., Horsmanheimo, S., Laskennat uusilla tutkaheijastinmalleilla, Tutkimusraportti Merenkululaitokselle, VTT Tietotekniikka, 15.8.2005, 34 s.

